

Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre la germinación, desarrollo morfométrico y calidad de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb

Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Germination, Morphometric Development, and Seedling Quality of *Gmelina arborea* Roxb

Efeito das bactérias rizobióticas promotoras do crescimento vegetal na germinação, no desenvolvimento morfométrico e na qualidade das plântulas de *Gmelina arborea* Roxb

Nieto Rodriguez, Enrique José
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

jnieto@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7919-9918>



Naomi Kaymara, Wong Carriel
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

naomi.wong2017@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-5393-7640>



Cruz Rosero, Nicolás Javier
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

jcruz@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5793-9380>



Pacho Arroyo, Gimabel Tamara
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

gimabel.pacho2017@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-1190-1111>



Solorzano Loor, Ander
Investigador Independiente

solorzanolorander@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-4254-8514>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/n1/1529>

Como citar:

Nieto Rodriguez, E.-J., Naomi-Kaymara, W. C., Cruz-Rosero, N. J., Pacho-Arroyo, G. T., & Solorzano-Loor, A. (2026). Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre la germinación, desarrollo morfométrico y calidad de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. *Código Científico Revista De Investigación*, 7(1), 798–818.

Recibido: 22/05/2026

Aceptado: 19/06/2026

Publicado: 30/06/2026

Resumen

La optimización de la producción forestal en regiones tropicales está limitada por la degradación del suelo, la baja disponibilidad de nutrientes y el bajo establecimiento de plántulas en etapas iniciales de crecimiento. En este contexto, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) se presentan como una alternativa biotecnológica sostenible para mejorar la germinación, el desarrollo radicular y la eficiencia en la absorción de nutrientes. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la inoculación microbiana sobre la germinación, el crecimiento morfométrico y la calidad de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. bajo condiciones de invernadero controlado. Los tratamientos evaluados fueron T1 H1 Dilución 1 T2 H1 Dilución 2 T3 H1 Dilución 3 T4 H2 Dilución 1 T5 H2 Dilución 2 T6 H2 Dilución 3 T7 H3 Dilución 1 T8 H3 Dilución 2 T9 H3 Dilución 3 y T10 testigo sin inoculación en condiciones experimentales controladas de invernadero tropical Ecuador. Se empleó un diseño completamente al azar con diez tratamientos, incluyendo nueve combinaciones de aislamientos microbianos y diluciones y un testigo sin inoculación, con tres repeticiones por tratamiento y cinco plantas por unidad experimental, totalizando 150 plántulas. Las variables evaluadas fueron porcentaje de germinación, altura de planta, diámetro del tallo, número de hojas y longitud radicular, registradas durante 40 días. Los resultados evidenciaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. El tratamiento T7 (H3 + Dilución 1) presentó el mayor porcentaje de germinación (50.2 %), superando ampliamente al control. Asimismo, T9, T6 y T1 mostraron mayores incrementos en crecimiento, destacando T9 con 31.80 cm de altura y 25.0 cm de longitud radicular. Se concluye que la inoculación con bioinoculantes microbianos mejora la calidad morfológica y el vigor de las plántulas de *G. arborea*, aunque se recomienda validar su desempeño en campo.

Palabras clave: Melina; bioinoculantes; calidad de planta; desarrollo radicular; silvicultura tropical; promoción del crecimiento vegetal.

Abstract

The optimization of forest production in tropical regions is constrained by soil degradation, low availability of essential nutrients, and poor seedling establishment during the early growth stages. In this context, plant growth-promoting microorganisms (PGPM) represent a sustainable biotechnological alternative to enhance germination, root development, and nutrient uptake efficiency. The objective of this study was to evaluate the effect of microbial inoculation on germination, morphometric growth, and seedling quality of *Gmelina arborea* Roxb. under controlled greenhouse conditions. The treatments evaluated were T1 H1 Dilution 1, T2 H1 Dilution 2, T3 H1 Dilution 3, T4 H2 Dilution 1, T5 H2 Dilution 2, T6 H2 Dilution 3, T7 H3 Dilution 1, T8 H3 Dilution 2, T9 H3 Dilution 3, and T10 control without inoculation under controlled experimental conditions in a tropical greenhouse in Ecuador. A completely randomized design was used with ten treatments, including nine combinations of microbial isolates and dilutions and one uninoculated control, with three replicates per treatment and five plants per experimental unit, totaling 150 seedlings. The evaluated variables included germination percentage, plant height, stem diameter, number of leaves, and root length, recorded over a 40-day experimental period. The results showed significant differences ($p < 0.05$) among treatments for all analyzed variables. Treatment T7 (H3 + Dilution 1) achieved the highest germination percentage (50.2%), far exceeding the control. Likewise, T9, T6, and T1 promoted the greatest vegetative growth, with T9 reaching an average height of 31.80 cm and a root length of 25.0 cm at the end of the experiment. It is concluded that microbial bioinoculation enhances the morphological quality and vigor of *G. arborea* seedlings; however, further studies are required to validate their performance under field conditions.

Keywords: Gmelina arborea; bioinoculants; seedling quality; root development; tropical forestry; plant growth promotion.

Resumo

A otimização da produção florestal nas regiões tropicais é limitada pela degradação do solo, pela baixa disponibilidade de nutrientes essenciais e pelo fraco enraizamento das plântulas durante as fases iniciais de crescimento. Neste contexto, os microrganismos promotores do crescimento vegetal (PGPM) representam uma alternativa biotecnológica sustentável para melhorar a germinação, o desenvolvimento radicular e a eficiência na absorção de nutrientes. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da inoculação microbiana na germinação, no crescimento morfológico e na qualidade das plântulas de *Gmelina arborea* Roxb. em condições controladas de estufa. Os tratamentos avaliados foram T1 H1 Diluição 1, T2 H1 Diluição 2, T3 H1 Diluição 3, T4 H2 Diluição 1, T5 H2 Diluição 2, T6 H2 Diluição 3, T7 H3 Diluição 1, T8 H3 Diluição 2, T9 H3 Diluição 3 e T10 controlo sem inoculação, em condições experimentais controladas numa estufa tropical no Equador. Foi utilizado um plano completamente aleatório com dez tratamentos, incluindo nove combinações de isolados microbianos e diluições e um controlo não inoculado, com três réplicas por tratamento e cinco plantas por unidade experimental, totalizando 150 plântulas. As variáveis avaliadas incluíram a percentagem de germinação, a altura da planta, o diâmetro do caule, o número de folhas e o comprimento da raiz, registados ao longo de um período experimental de 40 dias. Os resultados revelaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos para todas as variáveis analisadas. O tratamento T7 (H3 + Diluição 1) atingiu a percentagem de germinação mais elevada (50,2 %), superando largamente o controlo. Da mesma forma, os tratamentos T9, T6 e T1 promoveram o maior crescimento vegetativo, tendo o T9 atingido uma altura média de 31,80 cm e um comprimento radicular de 25,0 cm no final da experiência. Conclui-se que a bioinoculação microbiana melhora a qualidade morfológica e o vigor das plântulas de *G. arborea*; no entanto, são necessários mais estudos para validar o seu desempenho em condições de campo.

Palavras-chave: *Gmelina arborea*; bioinoculantes; qualidade das plântulas; desenvolvimento radicular; silvicultura tropical; promoção do crescimento das plantas.

Introducción

La silvicultura representa un sector consolidado a nivel global, cuyo abastecimiento comercial e industrial depende directamente de la producción a gran escala de plántulas de alta calidad en viveros (Grossnickle y Ivetić, 2022). En las regiones tropicales, el cultivo de especies arbóreas adquiere una relevancia económica y ecológica creciente para la reforestación (Yu et al., 2023). Sin embargo, la optimización de este sector enfrenta limitaciones edáficas severas en el entorno tropical. Un alto porcentaje de estos suelos se caracteriza por un avanzado grado de meteorización, acidez pronunciada y una baja disponibilidad natural de nutrientes minerales esenciales como el fósforo (Ferreira et al., 2025;

Luo et al., 2024). Estas severas restricciones químicas reducen drásticamente la eficiencia en la absorción y uso de macro y micronutrientes. Como consecuencia, se compromete el desarrollo vigoroso de las especies leñosas durante sus etapas iniciales de crecimiento (Ali et al., 2022).

Ante este escenario, la dependencia continua de fertilizantes sintéticos industriales para mitigar la escasez de nutrientes genera un impacto económico adverso (Campos et al., 2023). Asimismo, el uso indiscriminado de estos agroquímicos deteriora la salud fisicoquímica del suelo y eleva el riesgo de contaminación ambiental (Basu et al., 2021). Lo anterior subraya la necesidad de transitar hacia prácticas de manejo silvicultural más sostenibles apoyadas en alternativas biotecnológicas (Wahab et al., 2024). Dentro de las especies con alto potencial para el sector silvicultural y la restauración ecológica se encuentra *Gmelina arborea* Roxb. No obstante, su establecimiento exitoso en condiciones de vivero y campo se ve frecuentemente obstaculizado por restricciones nutricionales del sustrato. Esta problemática se intensifica por la ausencia de poblaciones nativas de microorganismos simbióticos eficientes en el suelo (Abreu et al., 2022).

Históricamente, las investigaciones sobre inoculantes biológicos se han centrado en leguminosas anuales o cultivos agrícolas tradicionales (Ferreira et al., 2024). Por el contrario, el estudio de las interacciones biológicas en especies forestales leñosas bajo esquemas de inoculación en condiciones de restricción edáfica sigue siendo un área que requiere mayor validación. Esta brecha de conocimiento limita el aprovechamiento de alternativas biotecnológicas viables que aceleren el crecimiento de las plántulas forestales (Grossnickle & Ivetić, 2022). De igual forma, se restringe el codiseño de estrategias que reduzcan los costos de producción en viveros y optimicen la robustez morfológica requerida para garantizar la supervivencia tras el trasplante definitivo en campo (Ferreira et al., 2025). Resulta imperativo,

por tanto, evaluar cómo los bioinoculantes vegetales mitigan el estrés abiótico y nutricional en especies maderables (Yu et al., 2023).

Como respuesta a estas limitaciones, el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal representa una estrategia innovadora, ecológica y de bajo costo para mejorar la calidad forestal (Basu et al., 2021). Entre estos agentes, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) desempeñan un papel fundamental en la rizosfera (Vessey, 2003). Estas bacterias estimulan la proliferación de raíces secundarias mediante la producción de fitohormonas de forma natural (Gómez et al., 2023). Dicho mecanismo incrementa la superficie de exploración radicular y optimiza la absorción de agua (Urban et al., 2022). Asimismo, estos microorganismos catalizan la solubilización de formas insolubles de fósforo y otros minerales esenciales, atenuando de forma natural las deficiencias del suelo (Luo et al., 2024).

La implementación de esta tecnología se justifica porque la sinergia microbiana potencia los índices morfológicos y fisiológicos de las plantas (Campos et al., 2023). Además, el uso de PGPR promueve el equilibrio biológico del sistema suelo-planta y disminuye la necesidad de insumos químicos peligrosos (Basu et al., 2021; Wahab et al., 2024). Con base en estos antecedentes, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre la germinación, el desarrollo morfométrico y la calidad general de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. bajo condiciones de invernadero.

Metodología

Área de estudio

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Biotecnología del Campus La María de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), ubicada en el kilómetro 7,5 de

la vía Quevedo–El Empalme, cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador. La estación experimental se localiza geográficamente a 1°03'18" de latitud sur y 79°25'24" de longitud oeste, a una altitud de 77,6 m s.n.m. La zona presenta características climáticas propias del bosque húmedo tropical, con temperaturas medias anuales cercanas a 25 °C, elevada humedad relativa y precipitaciones distribuidas durante gran parte del año, condiciones que favorecen el crecimiento y desarrollo de especies forestales de interés comercial como *Gmelina arborea* Roxb.

Tipo de investigación

El estudio correspondió a una investigación experimental desarrollada bajo condiciones controladas de vivero y laboratorio. La finalidad fue evaluar el efecto de diferentes aislamientos de hongos promotores del crecimiento vegetal (PGPM) aplicados en distintas concentraciones sobre el crecimiento inicial y la calidad morfológica de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. La manipulación directa de los tratamientos permitió determinar la respuesta de variables relacionadas con el desarrollo vegetativo y radicular de las plantas durante la etapa de vivero.

Material biológico y recursos experimentales

Como material vegetal se utilizaron plántulas de *Gmelina arborea* Roxb., especie forestal ampliamente empleada en programas de reforestación y producción maderera debido a su rápido crecimiento y adaptación a condiciones tropicales. Los microorganismos evaluados correspondieron a tres aislamientos de hongos promotores del crecimiento vegetal, identificados como H1, H2 y H3, los cuales fueron previamente aislados y conservados bajo condiciones de laboratorio para garantizar su viabilidad y pureza microbiológica.

Para el establecimiento y manejo del experimento se emplearon diversos materiales de campo, entre ellos fundas de vivero, cinta métrica, calibrador Vernier, marcadores permanentes, guantes de protección, cuaderno de registro y cámara fotográfica para documentar el desarrollo de las plantas. En las actividades de laboratorio se utilizaron balanza

electrónica, cabina de flujo laminar, autoclave, tubos de ensayo, cajas Petri, matraces Erlenmeyer, micropipetas, asas de siembra y calentador eléctrico.

La preparación de los medios de cultivo y soluciones requeridas para la multiplicación y conservación de los microorganismos se realizó utilizando peptona, glicerol, agar, etanol y ácido clorhídrico. La organización de la información experimental se efectuó mediante Microsoft Excel y Microsoft Word, mientras que el análisis estadístico fue realizado utilizando el software InfoStat versión 2020.

Población experimental

La población experimental estuvo constituida por 150 plántulas de *Gmelina arborea* establecidas bajo condiciones de invernadero. Cada planta representó una unidad experimental independiente y fue sometida a los tratamientos microbiológicos correspondientes. Las plántulas fueron mantenidas bajo condiciones homogéneas de manejo, riego y luminosidad durante todo el período experimental con el propósito de minimizar la influencia de factores externos sobre las variables evaluadas.

Aplicación de tratamientos

Los tratamientos consistieron en la inoculación de tres aislamientos de hongos promotores del crecimiento vegetal (H1, H2 y H3), cada uno aplicado en tres niveles de dilución diferentes. Además, se incluyó un tratamiento testigo sin inoculación para comparar la respuesta de las plantas frente a la ausencia de microorganismos promotores. La inoculación se realizó siguiendo procedimientos de asepsia y manejo microbiológico establecidos para garantizar la uniformidad de la aplicación y evitar contaminaciones externas.

Posteriormente, las plántulas permanecieron en condiciones controladas de vivero durante un período de evaluación de 35 días, tiempo durante el cual se realizaron mediciones periódicas para registrar la evolución de las variables morfológicas estudiadas.

Variables evaluadas

Las evaluaciones se efectuaron durante cinco semanas consecutivas, realizando mediciones cada siete días después de la inoculación. Al finalizar el período experimental se registraron las siguientes variables:

Diámetro basal. Se determinó mediante un calibrador Vernier digital. La medición se realizó en la base del tallo, próxima al cuello de la raíz, y los resultados fueron expresados en centímetros.

Número de hojas. Se contabilizó el total de hojas completamente desarrolladas presentes en cada planta al momento de cada evaluación. Esta variable se utilizó como indicador del crecimiento vegetativo y de la capacidad fotosintética de las plántulas.

Longitud radicular. La longitud de la raíz principal fue medida utilizando una cinta métrica graduada, desde el cuello de la raíz hasta el ápice radicular. Los resultados fueron expresados en centímetros.

Índice de robustez. Este parámetro fue calculado mediante la relación entre la altura de la planta y el diámetro del cuello de la raíz. El índice constituye un indicador ampliamente utilizado para estimar la calidad morfológica de plántulas forestales y su potencial desempeño después del trasplante. Para su cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$IR = \text{Altura (cm)} / \text{Diámetro del cuello de la raíz (mm)}$$

Valores menores del índice indican generalmente plantas más robustas y con mejores probabilidades de supervivencia y establecimiento en campo.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA). Se evaluaron diez tratamientos conformados por nueve combinaciones de aislamientos fúngicos y diluciones, además de un tratamiento testigo sin inoculación. Cada tratamiento estuvo integrado por tres repeticiones y cada repetición por cinco unidades experimentales,

obteniéndose un total de 150 plantas evaluadas. Los tratamientos evaluados fueron: T1 (H1 + Dilución 1), T2 (H1 + Dilución 2), T3 (H1 + Dilución 3), T4 (H2 + Dilución 1), T5 (H2 + Dilución 2), T6 (H2 + Dilución 3), T7 (H3 + Dilución 1), T8 (H3 + Dilución 2), T9 (H3 + Dilución 3) y T10 (testigo sin inoculación).

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables evaluadas. Previamente se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$), las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey al 95 % de confianza. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software (Di Rienzo 2011).

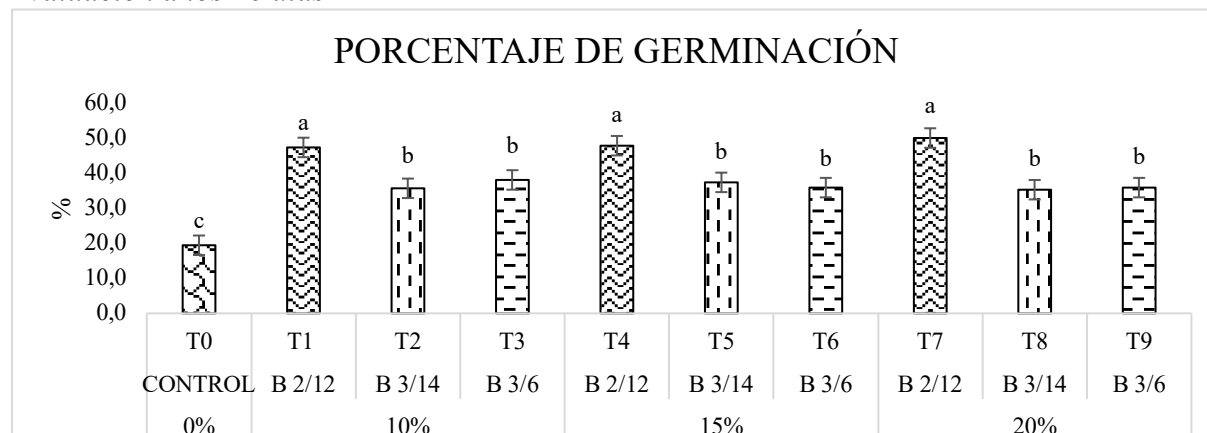
Resultados

Germinación de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

El porcentaje de germinación de las semillas de *Gmelina arborea* fue significativamente influenciado por la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Entre los tratamientos evaluados, el tratamiento T7, correspondiente a la cepa bacteriana 2/12 aplicada a una concentración del 20 %, presentó el mayor porcentaje de germinación, alcanzando un valor promedio de 50.2 %. Este resultado fue estadísticamente superior al observado en los demás tratamientos y al grupo control, cuyo porcentaje de germinación fue inferior al 20 % (Figura 1). Los resultados obtenidos evidencian el efecto positivo de las rizobacterias sobre los procesos fisiológicos asociados a la germinación, favoreciendo el establecimiento inicial de las plántulas.

Figura 1

Efectos de la inoculación de las bacterias PGPR en la germinación de semillas de *G. arborea*. Evaluación a los 20 días



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Altura de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

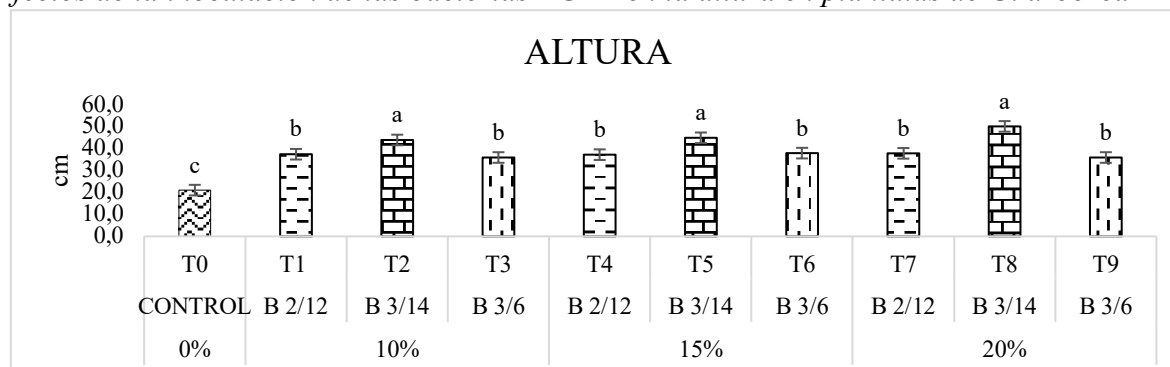
Al término de la quinta semana de evaluación, la altura de las plántulas de *Gmelina arborea* presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (Figura 1). Los mayores valores promedio correspondieron a los tratamientos T9, T6 y T1, con alturas de 31.80 cm, 28.87 cm y 27.80 cm, respectivamente. Estos resultados evidencian una respuesta favorable de las plántulas a la inoculación con microorganismos promotores del crecimiento vegetal, reflejando una mayor capacidad de crecimiento vegetativo en comparación con las plantas no inoculadas.

La superioridad observada en los tratamientos inoculados puede atribuirse a mecanismos asociados con la promoción del crecimiento vegetal, tales como la producción de fitohormonas, la mejora en la disponibilidad de nutrientes y la estimulación del desarrollo radicular. En contraste, el tratamiento control registró una altura promedio inferior a 17 cm, constituyéndose como el valor más bajo del experimento. Esta diferencia sugiere que la ausencia de microorganismos benéficos limita el crecimiento inicial de las plántulas durante la etapa de vivero.

Los resultados obtenidos indican que la inoculación microbiana favorece el crecimiento longitudinal de las plantas, característica fundamental en la producción de plántulas forestales de calidad, ya que una mayor altura está asociada con una mejor capacidad competitiva y adaptación durante el establecimiento en campo.

Figura 2

Efectos de la inoculación de las bacterias PGPR en la altura en plántulas de *G. arborea*



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Diámetro del tallo de *Gmelina arborea* Roxb. bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

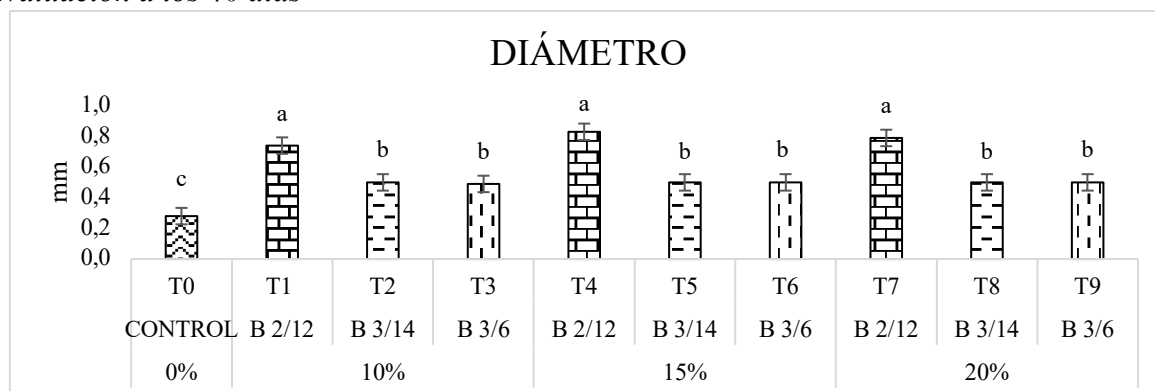
El diámetro del tallo mostró una respuesta positiva a los tratamientos con bioinoculantes durante la quinta semana de evaluación (Figura 2). Los tratamientos T1, T6 y T9 alcanzaron los mayores valores promedio, con registros de 0.40 mm, 0.36 mm y 0.35 mm, respectivamente. Estos resultados evidencian que la inoculación favoreció el engrosamiento del tallo, parámetro considerado uno de los principales indicadores de vigor y resistencia mecánica en plántulas forestales.

El incremento del diámetro puede estar relacionado con una mayor absorción de nutrientes esenciales y una mejora en los procesos fisiológicos asociados al crecimiento secundario de los tejidos vegetales. Por el contrario, las plántulas del tratamiento control registraron un diámetro promedio inferior a 0.21 mm, mostrando un desarrollo considerablemente menor respecto a los tratamientos inoculados.

Desde una perspectiva de calidad de planta, un mayor diámetro del tallo suele asociarse con una mejor capacidad de supervivencia después del trasplante, debido a que las plantas presentan una mayor reserva de carbohidratos y una estructura más robusta para enfrentar condiciones ambientales adversas.

Figura 3

Efectos de la inoculación de las bacterias PGPR en el diámetro en plántulas de *G. arborea*. Evaluación a los 40 días



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Número de hojas de *gmelina arborea roxb.* bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

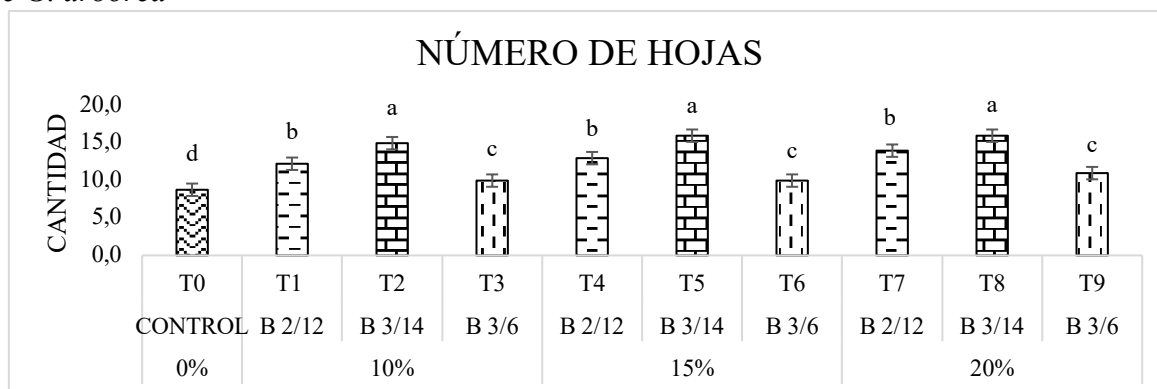
El número de hojas por plántula presentó diferencias entre los tratamientos evaluados al finalizar el período experimental (Figura 3). Los tratamientos T9, T6 y T1 registraron los mayores promedios, alcanzando 10.27, 9.87 y 9.40 hojas por planta, respectivamente. Estos resultados demuestran que la inoculación con microorganismos promotores del crecimiento estimuló la formación de estructuras foliares durante las primeras etapas de desarrollo.

La producción de hojas constituye un indicador relevante de la actividad fotosintética potencial de las plantas, ya que una mayor superficie foliar favorece la captura de radiación solar y la síntesis de fotoasimilados necesarios para el crecimiento. En este contexto, las plántulas sometidas a los tratamientos inoculados mostraron una ventaja fisiológica respecto al grupo control, cuyo promedio fue inferior a 7.40 hojas por planta.

La mayor emisión foliar observada en los tratamientos destacados sugiere una interacción positiva entre los microorganismos inoculados y el metabolismo vegetal, contribuyendo al incremento de la biomasa aérea y al mejor desempeño general de las plántulas.

Figura 4

Efectos simples de la inoculación de las bacterias PGPR en el número de hojas en plántulas de *G. arborea*



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0,05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Índice de robustez de *Gmelina arborea* Roxb. bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

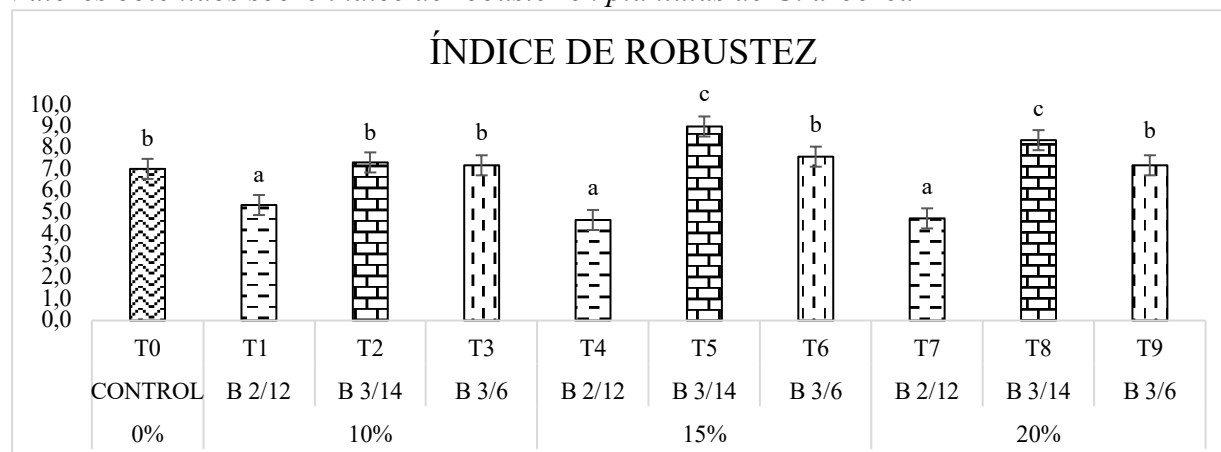
El índice de robustez, calculado mediante la relación entre la altura de la planta y el diámetro del cuello de la raíz, presentó diferencias entre tratamientos durante la quinta semana de evaluación (Figura 4). Los tratamientos T3, T6 y T9 alcanzaron los valores más elevados para esta variable, mostrando similitud estadística entre ellos y superando ampliamente los registros obtenidos por el tratamiento control.

Los resultados indican que la inoculación con hongos del género *Trichoderma* contribuyó significativamente a mejorar la calidad morfológica de las plántulas. Un adecuado índice de robustez es considerado un indicador de equilibrio entre el crecimiento en altura y el desarrollo estructural del tallo, condición que favorece la estabilidad mecánica y el establecimiento posterior en campo.

El tratamiento control registró un valor promedio inferior a 100.67, evidenciando una menor calidad morfológica en comparación con las plantas inoculadas. En términos prácticos, las plántulas con mejores índices de robustez poseen mayores probabilidades de supervivencia y adaptación después del trasplante.

Figura 5

Valores obtenidos sobre índice de robustez en plántulas de *G. arborea*



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Peso foliar de *gmelina arborea roxb.* bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

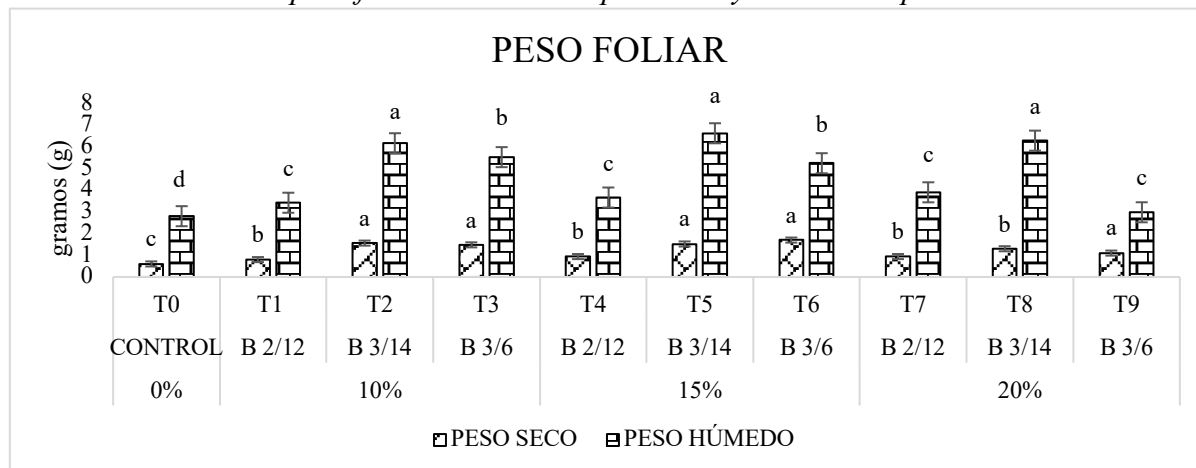
La evaluación de la biomasa foliar evidenció diferencias entre los tratamientos aplicados (Figura 5). Los tratamientos T3, T9 y T5 registraron los mayores valores promedio de peso foliar, alcanzando 5.6 g, 5.0 g y 4.90 g, respectivamente. Estos resultados reflejan una mayor acumulación de materia seca en las hojas como consecuencia de la acción de los microorganismos promotores del crecimiento.

La biomasa foliar constituye un parámetro estrechamente relacionado con la capacidad fotosintética y el potencial productivo de las plántulas. Los mayores valores observados en los tratamientos inoculados indican una mayor eficiencia en la captación y utilización de recursos, favoreciendo la acumulación de compuestos estructurales y de reserva.

En contraste, las plantas del tratamiento control presentaron los menores valores de peso foliar, lo que evidencia un crecimiento menos vigoroso y una menor capacidad para acumular biomasa durante el período experimental.

Figura 6

Valores obtenidos del peso foliar en cuanto al peso seco y húmedo en plántulas de *G. arborea*



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Longitud radicular de *gmelina arborea roxb.* bajo la influencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

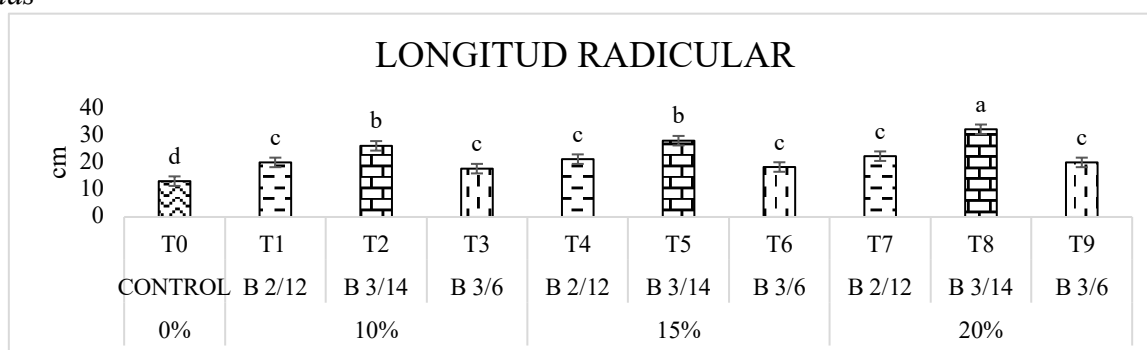
La longitud del sistema radicular mostró una respuesta positiva a la inoculación microbiana al finalizar la quinta semana de evaluación (Figura 6). Los tratamientos T9, T6 y T1 alcanzaron los mayores promedios, con valores de 25.0 cm, 20.0 cm y 18.3 cm, respectivamente. Estos resultados demuestran que la aplicación de microorganismos benéficos favoreció el crecimiento y la exploración del suelo por parte de las raíces.

El desarrollo radicular constituye una característica determinante en la calidad de las plántulas forestales, debido a que influye directamente sobre la absorción de agua y nutrientes, así como sobre la capacidad de adaptación a condiciones de estrés hídrico. Las plantas inoculadas desarrollaron sistemas radicales más extensos y potencialmente más eficientes que las plantas del tratamiento control.

Por el contrario, el grupo testigo presentó una longitud radicular promedio inferior a 21.8 cm, evidenciando una menor capacidad de crecimiento subterráneo. En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y microorganismos asociados constituye una estrategia efectiva para mejorar el desarrollo morfológico y la calidad de plántulas de *Gmelina arborea* producidas en vivero.

Figura 7

Valores obtenidos sobre la longitud radicular en plántulas de *G. arborea*. Evaluación a los 40 días



Nota: Las barras de error indican \pm ES; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey) (Autores, 2026).

Discusión

La inoculación microbiana influyó de manera significativa en la germinación de las semillas y en el desarrollo morfológico inicial de plántulas de *Gmelina arborea* Roxb., evidenciando un efecto positivo en su establecimiento en vivero. De Andrade et al. (2023) señalan que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal favorece el desarrollo inicial al estimular la producción de fitohormonas en la rizósfera, mejorando procesos fisiológicos clave. En el presente estudio, la aplicación de PGPR y microorganismos asociados incrementó significativamente la germinación y mejoró variables morfológicas como altura, diámetro del tallo, biomasa fresca y seca, emisión foliar y desarrollo radicular, superando ampliamente al tratamiento control. Pérez et al. (2023) destacan que la imbibición bacteriana fortalece el vigor y crecimiento temprano de las plántulas, mientras que Manzar et

al. (2022) confirman que estos bioagentes optimizan la absorción de nutrientes y mejoran la arquitectura radicular, promoviendo una mayor calidad de planta forestal.

El incremento sustancial en el porcentaje de germinación de las semillas de *G. arborea* —donde el tratamiento T7 alcanzó un promedio de 50.2 % frente a valores inferiores al 20 % en el grupo control— evidencia que los microorganismos aplicados intervienen positivamente en los procesos fisiológicos iniciales de la semilla. Esta tendencia coincide con lo reportado por Basu et al. (2021), quienes señalan que ciertas estirpes de PGPR poseen la capacidad de potenciar la emergencia de las plántulas y mejorar el establecimiento inicial del cultivo mediante interacciones sinérgicas en la rizósfera. El estímulo observado sugiere que la concentración y la cepa bacteriana específicas del tratamiento T7 lograron colonizar de forma eficiente el nicho espermoférico, activando vías metabólicas que aceleran o rescatan la viabilidad germinativa de la especie.

En cuanto al desarrollo vegetativo aéreo, los tratamientos T9, T6 y T1 promovieron de forma consistente los mayores promedios en altura (destacando T9 con 31.80 cm), diámetro del tallo (T1 con 0.40 mm) y número de hojas por planta (T9 con 10.27), superando con amplitud los registros deficientes del grupo testigo. Al respecto, en la literatura científica se establece que los efectos directos de las PGPR en la bioestimulación vegetal ocurren mediante la regulación de los niveles de fitohormonas —como auxinas, citoquininas y giberelinas— y la mejora en la adquisición y solubilización de nutrientes minerales esenciales presentes en el suelo (Basu et al., 2021). La mayor emisión de estructuras foliares y el incremento concomitante en el peso foliar (registrado principalmente en T3, T9 y T5) suponen una ventaja fisiológica clave, puesto que una superficie fotosintética expandida optimiza la captura de radiación solar y la consecuente síntesis de fotoasimilados necesarios para el crecimiento secundario de los tejidos (Basu et al., 2021).

A nivel subterráneo, la longitud del sistema radicular exhibió un comportamiento favorable, liderado por el tratamiento T9 (25.0 cm) en comparación con el testigo (inferior a 21.8 cm). Este patrón de elongación radicular representa un indicador crítico de calidad, ya que un sistema radical extenso incrementa el área de exploración del sustrato, optimizando la absorción de agua y nutrientes esenciales (Basu et al., 2021). Asimismo, los resultados del índice de robustez revelaron que la inoculación con hongos del género *Trichoderma* (tratamientos T3, T6 y T1) contribuyó significativamente a equilibrar la relación entre el crecimiento en altura y el diámetro del tallo. Esta respuesta concuerda con las observaciones de Yu et al. (2023), quienes demostraron que la inoculación con cepas seleccionadas de *Trichoderma* promueve el crecimiento general, regula las respuestas fisiológicas y mejora la absorción de nitrógeno, fósforo y potasio a través de la modulación enzimática y nutricional en la rizósfera. El balance morfológico derivado de un adecuado índice de robustez y un tallo más grueso dota a las plántulas de una estructura robusta y de mayores reservas de carbohidratos, parámetros determinantes para asegurar la estabilidad mecánica y mitigar el estrés por trasplante en campo (Yu et al., 2023).

A pesar de los resultados positivos obtenidos, deben reconocerse ciertas cautelas interpretativas derivadas del alcance del presente estudio. Los datos reportados se circunscriben estrictamente a evaluaciones a corto plazo (entre los 20 y 40 días) y bajo las condiciones controladas de una etapa de vivero, utilizando un sustrato previamente esterilizado para aislar el efecto microbiano. En entornos de campo, la efectividad de los bioinoculantes puede verse condicionada por factores limitantes como la competencia con la microbiota nativa del suelo, las variaciones climáticas, las fluctuaciones de pH o la presencia de contaminantes, elementos que suelen afectar la supervivencia de las cepas introducidas (Basu et al., 2021). Por lo tanto, aunque la inoculación demuestra ser una herramienta biotecnológica promisoriosa para mejorar los atributos de calidad morfológica de *G. arborea*, el éxito definitivo de estas plántulas

dependerá de su desempeño adaptativo y de su capacidad competitiva real durante el establecimiento definitivo en plantaciones forestales.

Conclusión

Los resultados demuestran que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y microorganismos asociados, especialmente en los tratamientos T7 y T9, constituye una alternativa biotecnológica eficaz para optimizar la producción de *Gmelina arborea* en vivero. Los bioinoculantes incrementaron significativamente la germinación de las semillas y mejoraron el crecimiento aéreo y radicular, reflejado en mayores valores de altura, diámetro del tallo, número de hojas, biomasa y longitud de raíces. Además, se validó el uso de consorcios microbianos capaces de mejorar la robustez y calidad morfológica de las plántulas durante las primeras etapas de desarrollo. Sin embargo, estos resultados se limitan a condiciones controladas de vivero, por lo que su eficacia en campo requiere evaluaciones adicionales.

Referencias bibliográficas

- Abreu, G. M., Paiva, H. N., Megumi Kasuya, M. C., Paula, S. D., Guirardi, B. D., & Araújo, G. M. (2022). Soil of the parent plant and AMF mix improve Cerrado seedlings growth in forest nurseries. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 15(3), 197–205. <https://doi.org/10.3832/ifor3833-015>
- Ali, S., Khan, M. J., Anjum, M. M., Khan, G. R., & Ali, N. (2022). Trichoderma harzianum modulates phosphate and micronutrient solubilization in the rhizosphere. *Gesunde Pflanzen*, 74(4), 853–862. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00656-3>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Campos, E. V., Pereira, A., Aleksieienko, I., Carmo, G. C., Gohari, G., Santaella, C., & Oliveira, H. C. (2023). Encapsulated plant growth regulators and associative microorganisms: Nature-based solutions to mitigate the effects of climate change on plants. *Plant Science*, 331, 111688. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111688>

- De Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), Artículo 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2011). InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Ferreira, N. C. d. F., Gatto, A., & Ramos, M. L. G. (2025). Co-inoculation of *Trichoderma harzianum* and *Bradyrhizobium* species augment the growth of *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake seedlings. *Microorganisms*, 13(3), 630. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13030630>
- Ferreira, N. C. d. F., Ramos, M. L. G., & Gatto, A. (2024). Use of *Trichoderma* in the production of forest seedlings. *Microorganisms*, 12(2), 237. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020237>
- Gómez Godínez, L. J., Aguirre-Noyola, J. L., Martínez-Romero, E., Arteaga-Garibay, R. I., Ireta-Moreno, J., & Ruvalcaba-Gómez, J. M. (2023). A look at plant-growth-promoting bacteria. *Plants*, 12(8), 1668. <https://doi.org/10.3390/plants12081668>
- Grossnickle, S. C., & Ivetić, V. (2022). Root system development and field establishment: Effect of seedling quality. *New Forests*, 53(6), 1021–1067. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09916-y>
- Luo, Y., Ma, L., Feng, Q., Luo, H., Chen, C., Wang, S., & Li, N. (2024). Influence and role of fungi, bacteria, and mixed microbial populations on phosphorus acquisition in plants. *Agriculture*, 14(3), 358. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030358>
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K., & Singh, H. V. (2022). *Trichoderma*: Advent of versatile biocontrol agent, its secrets and insights into mechanism of biocontrol potential. *Sustainability*, 14(19), Artículo 12786. <https://doi.org/10.3390/su141912786>
- Pérez-García, L.-A., Sáenz-Mata, J., Fortis-Hernández, M., Navarro-Muñoz, C. E., Palacio-Rodríguez, R., & Preciado-Rangel, P. (2023). Plant-growth-promoting rhizobacteria improve germination and bioactive compounds in cucumber seedlings. *Agronomy*, 13(2), Artículo 315. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020315>
- Prieto-Benavides, O. O., Jiménez-Romero, E. M., Mendoza-Velez, G. M., & Lopez-Aguilar, J. L. (2026). *Trichoderma* spp. como inductores de tolerancia al estrés salino y promotores del crecimiento temprano en plántulas de *Capsicum annuum* L. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 4(1), 140-153. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n1/137>
- Urban-Chmiel, R., Marek, A., Stępień-Pyśniak, D., Wiczorek, K., Dec, M., Nowaczek, A., & Osek, J. (2022). Antibiotic resistance in bacteria—A review. *Antibiotics*, 11(8), 1079. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11081079>
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571-586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>
- Wahab, A., Bibi, H., Batool, F., Hussain, M., Shah, G. M., Ali, S., Khan, M. N., & Rahman, M. H. U. (2024). Plant growth-promoting rhizobacteria biochemical pathways and their environmental impact: A review of sustainable farming practices. *Plant Growth*

Regulation, 104, 637–662. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01218-x>

Yu, C., Jiang, X., Xu, H., & Ding, G. (2023). *Trichoderma longibrachiatum* Inoculation Improves Drought Resistance and Growth of *Pinus massoniana* Seedlings through Regulating Physiological Responses and Soil Microbial Community. *Journal of Fungi*, 9(7), 694. <https://doi.org/10.3390/jof9070694>